

## Многопараметрические расчетные исследования генератора синтетических струй для активного управления течением в переходных каналах

© В.Г. Белова, В.А. Степанов

ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

*Представлено численное исследование влияния блоков генераторов синтетических струй на течение в переходных каналах с помощью RANS и URANS методов. Синтетические струи нулевого массового расхода газа — перспективное активное средство управления течением. С их помощью можно уменьшить или ликвидировать отрыв потока в переходных каналах, улучшая характеристики авиационной силовой установки в целом. Расчеты выполнены при полном моделировании процесса генерации синтетических струй в переходных каналах. Описаны газодинамические процессы в полости резонатора генераторов синтетических струй. Отработана методика расчета течения и оценки потерь в диффузорных каналах с применением блоков генераторов синтетических струй. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных в модельном кольцевом канале без использования активных средств управления, что дало возможность применить эту методику для решения других задач подобного типа. Выполнены многопараметрические расчетные исследования в плоском модельном канале в целях определения наилучших вариантов расположения и характеристик генераторов синтетических струй. Проведен расчет сегмента натурного «агрессивного» канала между турбинами высокого и низкого давления современного турбореактивного двигателя с применением блоков генераторов синтетических струй, поскольку уменьшение потерь полного давления для такого типа блоков в модельном канале оказалось значительным. Применение блоков генераторов синтетических струй с необходимой амплитудой скорости и частотой колебаний, а также при оптимальном расположении в канале позволит улучшить характеристики двигателя в целом вследствие полной или частичной ликвидации зоны отрыва в переходном канале.*

**Ключевые слова:** активное управление, RANS и URANS методы, синтетические струи, переходный канал, агрессивный канал, кольцевой канал

**Введение.** Течение в переходных каналах [1] перспективных силовых установок — очень сложное и неравномерное. На различных режимах полета на выходе из канала могут возникать области с отрывными зонами, которые, в свою очередь, приводят к существенному увеличению потерь полного давления в переходных каналах, ухудшая характеристики двигателя в целом.

В последнее время наблюдается тенденция к «агрессивности» переходных каналов [2], т. е. уменьшение длины переходного участка канала на 20 % относительно стандартного с сохранением радиальных размеров, что позволяет сократить габариты и массу силовой установки. Однако это приводит к ухудшению картины течения на

выходе из канала. Поэтому управлению течением в переходных каналах уделяется все большее внимание в целях увеличения характеристик и уменьшения габаритов и массы силовой установки.

К пассивным средствам управления течением, с помощью которых можно уменьшить газодинамические потери в переходных каналах, относятся различного вида завихрители [3], которые устанавливаются внутрь канала перед зоной отрыва. С их помощью можно добиться значительного уменьшения газодинамических потерь в канале в зависимости от диффузорности и числа Маха на входе, но при этом положительный результат наблюдается только на одном режиме работы. Отсутствие регулирования, малый ресурс жизненного цикла и опасность попадания в турбину при разрушении — все это сильно осложняет применение пассивных средств управления в каналах современных авиадвигателей. Этих недостатков можно избежать, используя активные средства управления течением.

Вдув газа в поверхностный слой и отсос пристеночного воздуха [4, 5] в каналах силовой установки признаны лучшей альтернативой пассивным средствам, поскольку имеется возможность регулирования — включения при возникновении отрыва и отключения при его устранении. Это позволяет не только управлять течением в зависимости от режима работы, но и экономить рабочее тело. Тем не менее расходы на подведение и отведение воздуха осложняют их использование. В связи с указанными проблемами в последнее время началось внедрение такого активного средства управления течением, как генератор синтетических струй (ГСС) [6, 7]. Он представляет собой замкнутую полость с отверстием, через которое последовательно чередуются фазы вдува и отсоса газа за счет колебания стенок. Преимущество применения ГСС заключается в том, что он является независимой системой управления с нулевым расходом газа по времени. Для его работы необходимо только подать энергию для возбуждения колебаний, которые отвечают за изменение объема замкнутой полости. С помощью ГСС возможно также реализовать импульсно-непрерывный режим работы, позволяющий уменьшить затраты мощности.

В данной работе использованы блоки ГСС, разработанные и экспериментально исследованные в работе [8]. Отметим, что механизм воздействия блоков ГСС напрямую зависит от способа ориентации ГСС в канале и его амплитудно-частотных характеристик. Причем в последнее время вдув струй рассматривается под углом в различных направлениях [9].

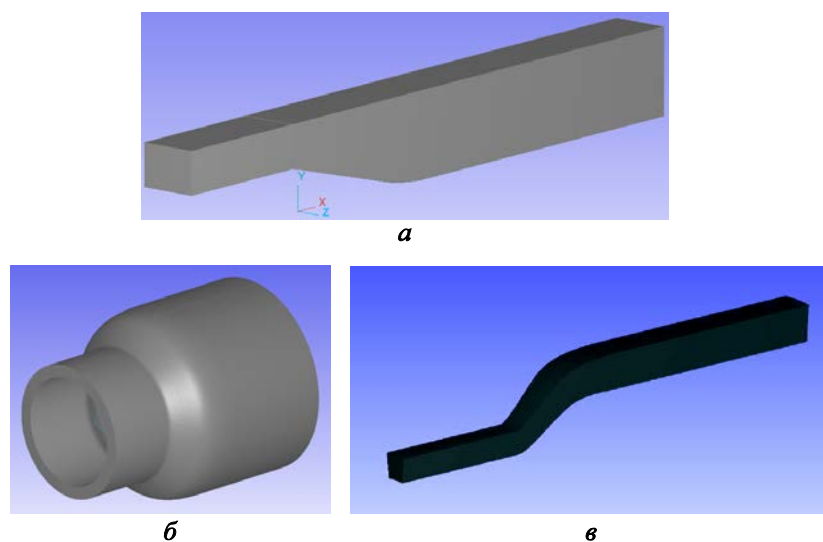
Цель работы — отработать численную методику расчета течения в диффузорных каналах и оценки потерь, определить наилучшие варианты расположения и характеристики ГСС в модельном плоском канале, а также исследовать влияние ГСС на течение в натурном «агрессивном» канале между турбинами высокого и низкого давления.

**Геометрия и расчетная сетка переходных каналов и блоков генераторов синтетических струй.** В качестве активного средства управления течением были взяты блоки ГСС, описанные в работе [8]. Исследование блоков ГСС рассматривалось в двух диффузорных переходных каналах: модельном плоском канале, натурном «агрессивном» кольцевом канале, геометрия которого приближена к стандартному каналу между турбинами высокого и низкого давления современного турбореактивного двухконтурного двигателя.

Плоский канал с углом раскрытия  $15^\circ$  состоит из входного участка высотой  $H_1 = 75$  мм и выходного участка высотой  $H_2 = 150$  мм при постоянной ширине канала  $L = 100$  мм (рис. 1, *а*). Для сокращения машинной памяти использовался только один сегмент кольцевого переходного канала из 32 (рис. 1, *б*, *в*). Натурный кольцевой канал состоит из входного участка с внутренним диаметром  $d_1 = 912$  мм, внешним —  $d_2 = 1125$  мм и выходного участка с внутренним диаметром  $D_1 = 1277$  мм и внешним  $D_2 = 1599$  мм. Модельный кольцевой канал относится к натурному каналу, масштаб 1:7,5. Во всех каналах длина входного и выходного участка была увеличена на длину в три-четыре калибра от высоты каналов с целью уменьшения влияния упрощенных граничных условий.

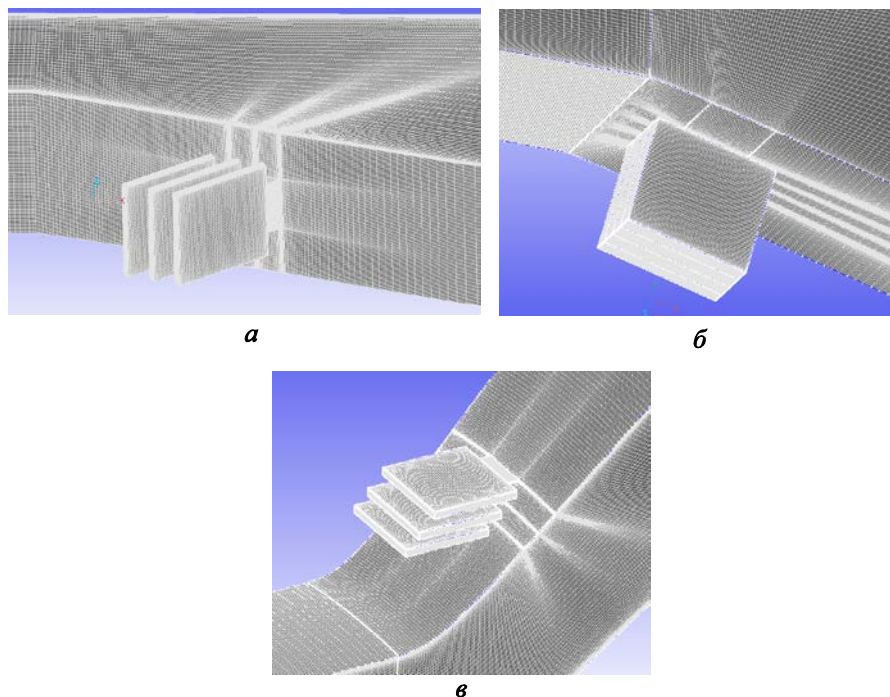
Численное моделирование проводилось для внутренней части блоков:

- 1) ГСС под углом  $45^\circ$  к потоку; размеры ГСС  $15 \times 65 \times 58$  мм (ширина  $\times$  длина  $\times$  высота);
- 2) ГСС с четырьмя щелями для сокращения машинной памяти; размеры ГСС  $38 \times 65 \times 58$  мм.



**Рис. 1.** Геометрия переходных каналов:

*а* — плоский канал; *б* — кольцевой «агрессивный» переходный канал; *в* — один сегмент кольцевого «агрессивного» переходного канала из 32 сегментов



**Рис. 2.** Расчетная сетка:

*a* — сетка плоского канала с ГСС под углом  $45^\circ$ ; *b* — сетка плоского канала с ГСС под прямым углом; *в* — сетка кольцевого канала с ГСС под углом  $45^\circ$

Для упрощения численного моделирования колебание мембран проводилось для прямоугольной стенки, а не круглой мембраны [8].

Сеточная модель диффузорных каналов разделена на три участка: входной, переходный и выходной. Блоки ГСС в каналах располагались на переходном участке. Для плоского канала была построена расчетная сетка с тремя блоками ГСС, количество ячеек во всей области составило  $2,9 \cdot 10^6$  (рис. 2, *a*), с одним блоком ГСС с четырьмя щелями и количеством ячеек —  $3,6 \cdot 10^6$  (рис. 2, *b*). Количество ячеек в одном из 32 сегментов с тремя блоками ГСС составило  $5 \cdot 10^6$  (рис. 2, *в*). Модельный кольцевой канал представлял собой один сегмент из восьми, в котором количество ячеек составляло  $2,4 \cdot 10^6$ . Сетка во всех областях неравномерная, поджата к стенкам для лучшего описания пристеночного течения. На стенках применялся «закон стенки», что позволило уменьшить количество ячеек во всей сетке.

**Начальные и граничные условия.** На входе в канал было задано полное давление  $P_0 = 1 \cdot 10^5$  Па и полная температура  $T_0 = 300$  К, на выходе для модельных каналов задавался перепад статического давления  $\Delta P = 2,5, 5,0, 7,5$  кПа, при этом скорость на входе составила  $120 \dots 220$  м/с (число Маха  $M = 0,3 \dots 0,7$ ), для натурального «агрессивно-го» канала перепад давления  $\Delta P = 2,5$  кПа, скорость на входе —  $105$  м/с (число Маха  $M = 0,3$ ).

Для проведения многопараметрического расчетного исследования в плоском модельном канале с применением активного средства управления течением для нахождения оптимальных вариантов расположения и характеристик ГСС на мембранах задавалось колебание расхода по гармоническому закону

$$G = G_A \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t\right), \quad (1)$$

где  $G$  — расход воздуха, кг/с;  $G_A$  — амплитуда расхода воздуха, кг/с;  $T_n$  — период работы ГСС, с<sup>-1</sup>;  $t$  — время работы блоков ГСС, с.

При постановке такого граничного условия был выявлен недостаток, из-за которого нельзя было решить задачу для натурального переходного канала между турбинами высокого и низкого давления. При колебании расхода в щели ГСС с течением времени резко повышалась температура, что приводило к срыву задачи. Для решения возникшей проблемы было принято в дальнейшем использовать граничное условие колебания сетки для всех задач, что исключает недостаток предыдущего граничного условия и при этом полностью отражает работу ГСС в действительности. Колебание мембраны задавалось с помощью колебания сетки по гармоническому закону

$$X = X_A \cos\left(\frac{2\pi}{T_n} t\right), \quad (2)$$

где  $X$  — отклонение мембраны, м;  $X_A$  — амплитуда отклонения мембраны, м.

Для плоского канала с тремя блоками ГСС под углом 45° на мембранах задавалось

$$X = 0,0009 \cos\left(\frac{2\pi}{0,001} t\right). \quad (3)$$

Частота колебаний мембраны при этом составляет 1 кГц. Высоко-частотная синтетическая струя воздействует на поток вдоль стенки канала.

Для плоского канала с блоком ГСС с четырьмя щелями под прямым углом на мембранах задавалось

$$X = 0,0005 \cos\left(\frac{2\pi}{0,00125} t\right). \quad (4)$$

При этом щели ГСС работают в противофазе, частота колебаний составляет 800 Гц. В этом случае продольная синтетическая струя (низкочастотная) порождает разнонаправленные вихри, которые сносятся потоком в ядре канала и взаимодействуют с ним, обеспечивая поступления высокоскоростного потока в зону отрыва [10].

**Математическая модель.** Пространственные вязкие трехмерные турбулентные течения вязкого сжимаемого газа моделировались на основе уравнений Навье — Стокса, интегрируемых методом конечных объемов в составе пакета фирмы ESI-Group ACE+ [11].

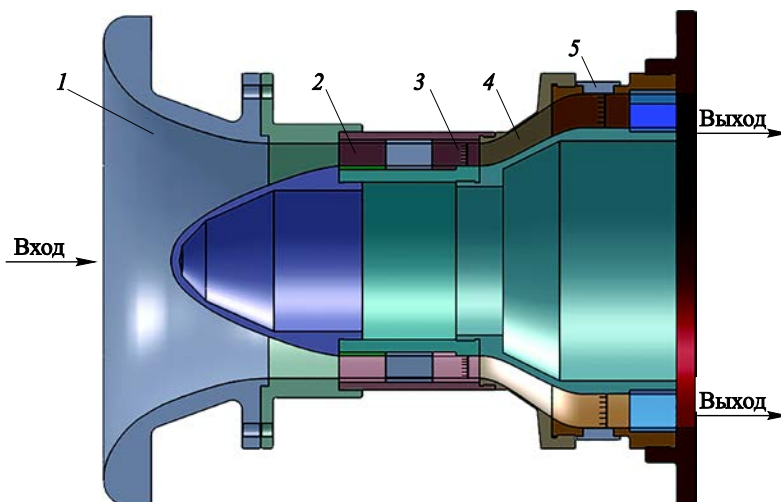
В данной работе проведено полное численное моделирование процесса генерации синтетических струй с описанием газодинамических процессов в полости резонатора ГСС с использованием *RANS* и *URANS* методов в сочетании с двухпараметрической *k*— $\epsilon$ -моделью турбулентности. Она является более устойчивой и приемлемой для решения задач с активными средствами управления течением, например, в работе [9] показано, что при использовании такого подхода получаются результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Шаг по времени во всех задачах составлял  $10^{-5}$  с, период колебаний мембран —  $10^{-3}$  с при частоте 1 кГц, следовательно, на фазы вдува и отсоса газа за один период приходилось 100 расчетных точек по времени.

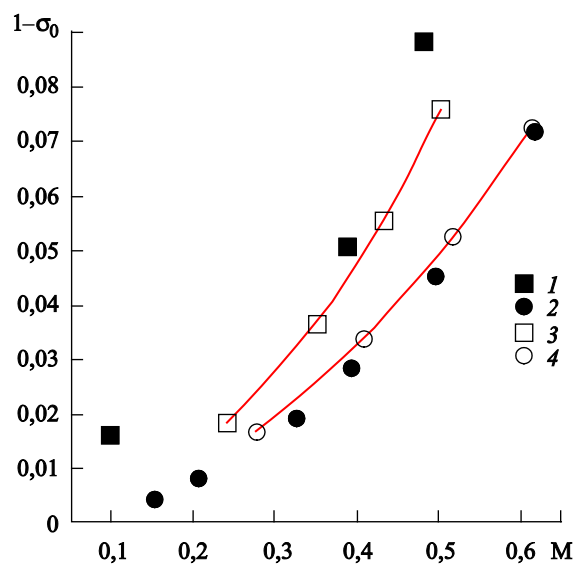
**Результаты расчетов.** Отработана численная методика расчета течения и оценки потерь в диффузорных каналах, заключающаяся в построении математической модели и расчетной сетки, задании начальных и граничных условий, а также в обработке полученных данных. С помощью этой методики получены расчетные параметры течения в модельном кольцевом канале стандартной и агрессивной длины без блоков ГСС. В работе также представлены результаты экспериментального исследования модельного кольцевого межтурбинного канала турбореактивного двухконтурного двигателя [12] (рис. 3) для сравнения с расчетными данными. Канал был оборудован лемникатным входным участком, который позволяет получить равномерные распределения полного давления и обеспечить безотрывное всасывание. Для имитации поля течения за турбиной высокого давления предусмотрена установка имитатора выходного каскада турбины из 30 лопаток толщиной 1 мм без закрутки ( $0^\circ$ ). Экспериментальная модель препарирована датчиками для замера статических давлений по длине и гребенками для регистрации полного давления в сечении входа и выхода кольцевого канала. На выходе канала задавалось разрежение в диапазоне  $\Delta p = 0 \dots 35$  кПа, что позволяло провести исследование в широком диапазоне значений числа Маха на входе  $M = 0 \dots 0,6$ . Значения числа Рейнольдса  $Re$  соответствовали  $(0,5 \dots 1,0) \cdot 10^6$  по высоте входного канала, что ниже натуральных значений, но позволяли работать в турбулентном режиме. Погрешность измерения давления  $1 \dots 2$  %.

Распределение потерь полного давления в базовом канале ( $1 - \sigma_0$ ) находится в зависимости (рис. 4) от числа Маха на входе  $M$  ( $\sigma_0$  — ко-

эффицент восстановления полного давления на выходе из канала). Получено достаточно хорошее совпадение расчета и эксперимента для модельного кольцевого канала, что позволяет использовать эту методику для дальнейших расчетов переходных каналов.



**Рис. 3.** Схема модельного кольцевого межтурбинного переходного канала:  
 1 — лемнискатный вход; 2 — имитатор выходного каскада турбины высокого давления из 30 лопаток без закрутки; 3 — гребенка полного давления для входного участка; 4 — переходный участок; 5 — гребенка полного давления для выходного участка



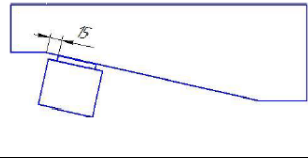
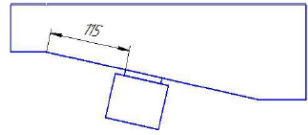
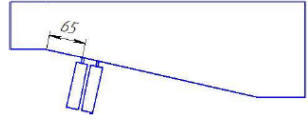
**Рис. 4.** Распределение потерь полного давления в выходном сечении кольцевого канала в зависимости от числа Маха на входе:

1, 2 — эксперимент для «агрессивного» и стандартного канала соответственно;  
 3, 4 — расчет для них же

С помощью численной методики подобраны наилучшие варианты расположения и характеристики ГСС в плоском канале. В результате расчетов получены массивы параметров течения. По ним определены локальные и осредненные характеристики течения в различных сечениях. Основным результатом расчетов стало сравнение потерь полного давления в канале с и без ГСС, а также определение эффективности использования блоков ГСС. Результаты многопараметрического расчетного исследования в модельном плоском канале с работой блоков ГСС получены осреднением по времени и по площади сечений на входе и выходе из канала (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты численных исследований для различных вариантов расположения и характеристик генераторов синтетических струй в плоском модельном канале**

Номер варианта задачи	Расположение блоков ГСС	$\nu$	$G_A$	M	$\sigma$	$\sigma_0$	$E\nu, \%$
№ 1		1	0,01	0,4971	0,9844	0,9835	5,3
		0,5	0,01	0,4926	0,9849	0,9835	8,2
		0,5	0,015	<b>0,3297</b>	<b>0,9932</b>	<b>0,9925</b>	<b>9,3</b>
		—	—	<b>0,4913</b>	<b>0,9850</b>	<b>0,9835</b>	<b>9,4</b>
		—	—	<b>0,6345</b>	<b>0,9732</b>	<b>0,9699</b>	<b>10,8</b>
№ 2		1	0,02	0,4907	0,9850	0,9830	10,8
№ 3		1	0,02	0,4934	0,9881	0,9798	17,1
		1	0,025	<b>0,3248</b>	<b>0,9939</b>	<b>0,9928</b>	<b>15,3</b>
		—	—	<b>0,4835</b>	<b>0,9869</b>	<b>0,9798</b>	<b>35</b>
		—	—	<b>0,6533</b>	<b>0,9741</b>	<b>0,9722</b>	<b>6,6</b>
№ 4		1	0,01	0,4998	0,9844	0,9847	-1,9

Обозначения:  $\nu$  — частота ГСС, кГц;  $G_A$  — амплитуда расхода воздуха, кг/с; M — число Маха на входе в канал;  $\sigma$  — коэффициент восстановления полного давления на выходе из канала для варианта с ГСС;  $E\nu$  — эффективность блоков ГСС, которая равна отношению разности между значениями  $\sigma$  и  $\sigma_0$  к величине потерь базового канала ( $1 - \sigma_0$ ).

По результатам многопараметрического расчетного исследования получены два наилучших варианта расположений и характеристик ГСС: 1) продольные блоки ГСС, расположенные в начале наклонного участка с амплитудой расхода 0,015 кг/с и частотой колебаний 0,5 кГц (№ 1); 2) поперечные блоки ГСС, направленные под углом 45°



к потоку, расположенные в начале отрывной зоны с амплитудой расхода 0,025 кг/с и частотой 1кГц (№ 3).

На основе полученных данных проведены расчетные исследования для двух наилучших вариантов расположения блоков ГСС в плоском канале № 1 и № 3 с граничными условиями в виде колебания сетки при числах Маха на входе в канал  $M = 0,3 \dots 0,7$  в стационарной (без работы ГСС) и нестационарной постановке (с работой ГСС). Все параметры, представленные ниже, получены осреднением по времени и по площади сечений на входе и выходе из переходного канала, при выходе блоков ГСС на установившийся режим работы по истечении 10 мс.

Воздействие продольного (№ 1) блока ГСС с четырьмя щелями на течение в модельном плоском канале можно видеть на рис. 5. При наличии работающего блока ГСС по истечении 10 мс (рис. 5, б) наблюдается незначительное уменьшение отрывной зоны на нижней стенке, эффективность использования блока ГСС в этом случае составляет 13...5 % при числе Маха на входе в канал 0,3...0,7 соответственно. Предполагается, что для увеличения эффективности продольного блока ГСС необходимо уменьшить частоту колебаний на 200...300 Гц, а амплитуду скорости на срезе с диффузором оставить 50...100 м/с.

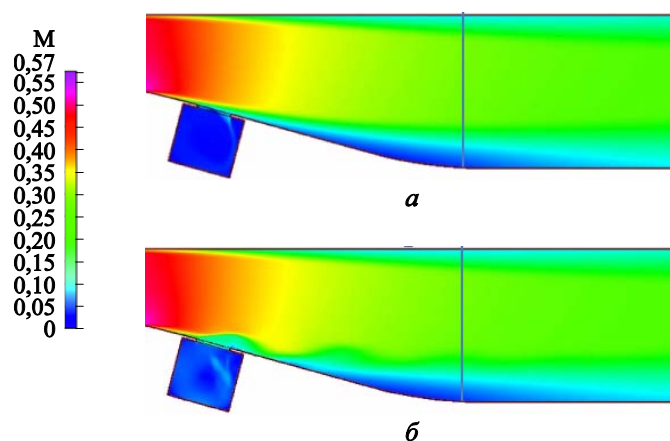
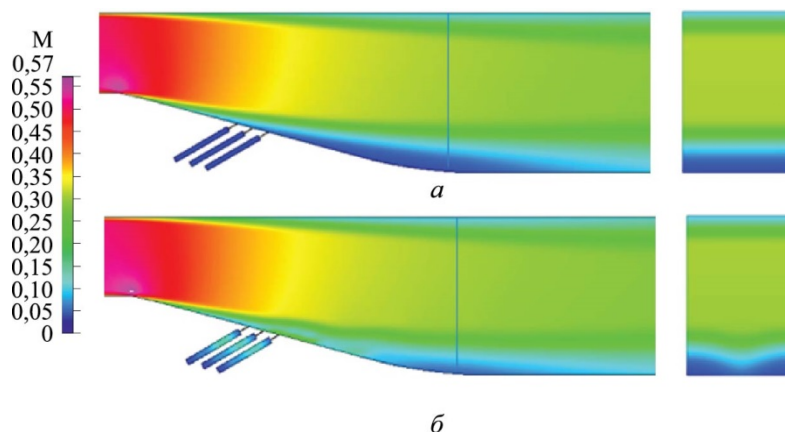


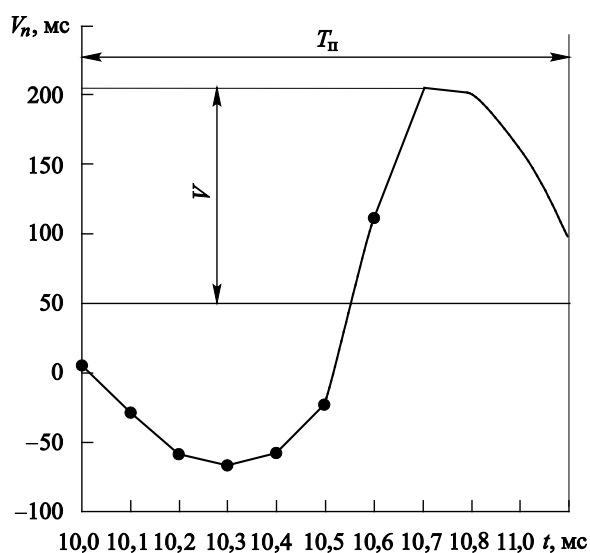
Рис. 5. Распределения значений числа Маха в продольном сечении (на входе  $M = 0,51$ ):

*a* — без работы ГСС; *б* — с работой ГСС при  $t = 10$  мс

Наглядное влияние трех поперечных (№ 3) блоков ГСС под углом  $45^\circ$  к потоку на течение в канале иллюстрирует рис. 6, где приведены поля числа Маха в продольном и поперечном сечении с работой блока ГСС и без него. При поперечном расположении блоков ГСС и основных параметрах синтетических струй (рис. 7) можно добиться значительного уменьшения потерь полного давления на выходе из канала (табл. 2).



**Рис. 6.** Распределения числа Маха в продольном (слева) и поперечном (справа) сечении при числе Маха на входе  $M = 0,51$ :  
 а — без работы ГСС; б — с работой ГСС при  $t = 10$  мс



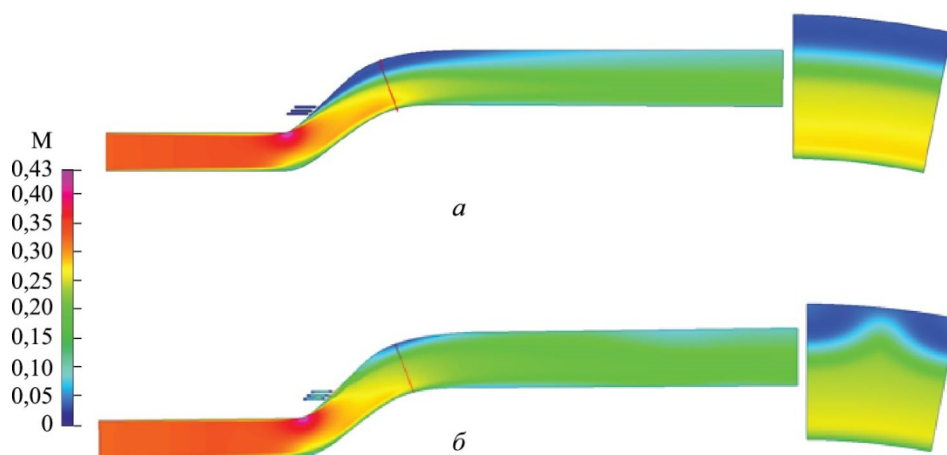
**Рис. 7.** Распределение нормальной составляющей скорости синтетической струи на срезе с диффузором по времени для канала с тремя блоками ГСС под углом  $45^\circ$ :  
 $V$  — амплитуда синтетической струи;  $T_п$  — период работы ГСС ( $\nu = 1$  кГц);  $T_п = 1$  мс

Таблица 2

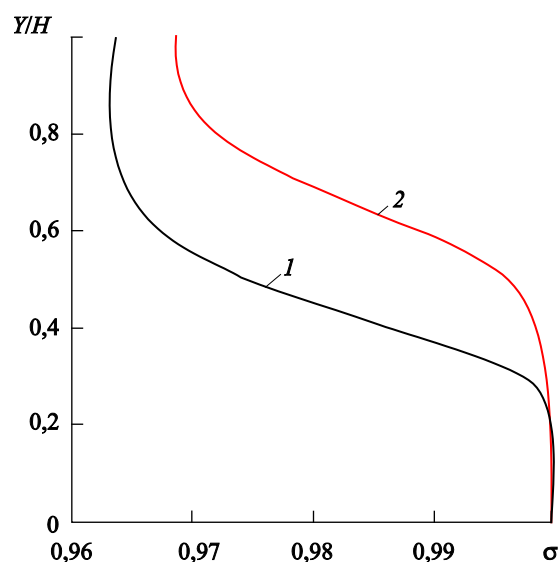
Результаты расчета для канала с тремя блоками генераторов синтетических струй под углом  $45^\circ$  к потоку при различных числах Маха на входе в канал

M	$\sigma_0$	$\sigma$	$1 - \sigma$	$1 - \sigma_0$	$\sigma - \sigma_0$	$E\nu, \%$
0,34	0,989	0,9926	0,0074	0,011	0,0035	32,2
0,51	0,9763	0,9808	0,0192	0,0237	0,0045	19,2
0,66	0,9558	0,961	0,039	0,0442	0,0052	11,8

На основе данных, полученных для плоского канала, проведен расчет для натурального переходного канала в турбине с тремя блоками ГСС под углом  $45^\circ$ . Так как проводится расчет нестационарной задачи, процесс развивается во времени и поэтому можно наблюдать (рис. 8) влияние струи на поток в целом на конечном этапе  $t = 22$  мс. Получены профили полного давления на выходе канала по высоте для случаев с и без ГСС (рис. 9).



**Рис. 8.** Распределения числа Маха в продольном (слева) и поперечном (справа) сечении при числе Маха на входе  $M = 0,3$  в сегменте кольцевого переходного канала:  
*a* — без работы ГСС; *б* — с работой ГСС при  $t = 22$  мс



**Рис. 9.** Распределение коэффициента восстановления полного давления  $\sigma$  на выходе из кольцевого диффузора при числе Маха на входе  $M = 0,3$ :  
*1* — без ГСС; *2* — с ГСС

Наблюдается наполнение профиля полного давления, т. е. увеличение коэффициента восстановления давления, что свидетельствует об эффективном воздействии блоков ГСС на течение в канале (см. рис. 7). Эффективность использования трех поперечных блоков ГСС под углом  $45^\circ$  к потоку составила 13,3 % при числе Маха на входе  $M = 0,3$ .

**Заключение.** Оработана методика расчета течения и оценки потерь в переходных каналах с применением блоков ГСС с помощью RANS и URANS методов. Получено достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных параметров течения в выходном сечении модельного кольцевого канала между турбинами высокого и низкого давления без работы блоков ГСС.

Расчетные исследования показали, что при значениях числа Маха на входе в модельный плоский канал в пределах  $0,3 \dots 0,7$  эффективность воздействия трех блоков ГСС под углом  $45^\circ$  к потоку достигает 33...12 % (при амплитуде скорости струи  $100 \dots 200$  м/с, частоте 1 кГц) и блоки ГСС расположены непосредственно перед началом отрывной зоны. Если значение числа Маха на входе в модельный плоский канал составляет  $0,3 \dots 0,7$ , положительный эффект от блока ГСС с четырьмя щелями достигает 13...5 % (при  $50 \dots 100$  м/с и  $0,5 \dots 0,8$  кГц соответственно) при расположении блоков ГСС в начале наклонного участка.

При использовании трех блоков ГСС, направленных под углом  $45^\circ$  к потоку в сегменте натурального переходного кольцевого канала, эффективность их использования составляет 13 % при значении числа Маха на входе  $M = 0,3$ .

Применение блоков ГСС в переходном канале между турбинами высокого и низкого давления позволит не только сократить массу и габариты силовой установки за счет сокращения длины переходного канала, но и уменьшить удельный расход топлива, что является существенным фактором в оценке эффективности силовой установки.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00271.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кашкин Ю.Ф., Коновалов А.Е., Крашенинников С.Ю., Любимов Д.А., Пудовиков Д.Е., Степанов В.А. Экспериментальное и расчетное исследование особенностей течения с отрывом потока в дозвуковых диффузорах. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2009, № 4, с. 91–99.
- [2] Потехина И.В., Любимов Д.А. Численное исследование управления с помощью синтетических струй отрывными течениями в переходных межтурбинных диффузорах. *Наука и образование*, 2015, № 1. DOI: 10.7463/0115.0753472
- [3] Lee S., Loth E., Babinsky H. Normal Shock Boundary Layer Control with Various Vortex Generator Geometries. *Computers & Fluids*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 233–246.

- [4] Debiasi M., Herberg M.R., Yan Z., Dhanabalan S.S., Tsai H.M., Dhanabalan S. Control of Flow Separation in S-Ducts via Flow Injection and Suction. *46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Ser. AIAA Paper* (Reno, Nevada, 7–10 January 2008). Reno, Nevada, USA, 2008, vol. 1355. Paper no. 2008-74. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2008-74>
- [5] Florea R., Bertuccioli L., Tillman T.G. Flow-control-enabled aggressive turbine transition ducts and engine system analysis. *3<sup>rd</sup> AIAA Flow Control Conference* (San Francisco, California, 5–8 June 2006). San Francisco, California, 2006. Paper no. 2006-3512. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2006-3512>
- [6] Zhang P.F., Wang J.J., Feng L.H. Review of zero-net-mass-flux jet and its application in separation flow control. *Science in China, Series E. Technological Sciences*, 2008, vol. 51 (9), pp. 1315–1359.
- [7] Lengani D., Simoni D., Ubaldi M., Zunino P., Bertini F. Application of a synthetic jet to control boundary layer separation under ultrahighlift turbine pressure distribution. *Flow Turbul. Combust.*, 2011, vol. 87 (4), pp. 597–616.
- [8] Белова В.Г., Макаров А.Ю., Маслов В.П., Степанов В.А. Проектирование блоков генераторов синтетических струй и экспериментальные исследования нестационарного истечения струй с помощью PIV-метода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3. DOI 10.18698/2308-6033-2018-3-1737
- [9] Mahfooz Z., Ahmed M.K., Guoping H. Conceptual Designing and Numerical Modeling of Micro Pulse Jet for Controlling Flow Separation. *International Journal of Engineering (IJE)*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 95–101.
- [10] Любимов Д.А. Исследование влияния струй с нулевым массовым расходом на течение в криволинейном диффузоре. *Теплофизика высоких температур*, 2011, т. 49, № 4, с. 557–567.
- [11] *ESI Group. CFD-ACE+*. 2014. URL: <https://www.esi-group.com/>
- [12] Макаров А.Ю., Степанов В.А., Маслов В.П. Экспериментальные и численные исследования методов управления потоком в переходных каналах авиационных двигателей. *Сб. докл. XI Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20–24 августа 2015*. Казань, 2015, с. 2428–2431.

Статья поступила в редакцию 21.12.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Белова В.Г., Степанов В.А. Многопараметрические расчетные исследования генератора синтетических струй для активного управления течением в переходных каналах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-4-1742>

**Белова Валерия Геннадьевна** — инженер отделения «Газовая динамика и теплофизика» ЦИАМ им. П.И. Баранова, аспирант кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научной деятельности: газовая динамика, вычислительная математика, теплофизика. e-mail: [belova.v.g@mail.ru](mailto:belova.v.g@mail.ru)

**Степанов Владимир Алексеевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника отделения «Газовая динамика и теплофизика» ЦИАМ им. П.И. Баранова. Автор более 40 печатных работ в области аэродинамики силовых установок летательных аппаратов. Область научной деятельности: газовая динамика, вычислительная математика. e-mail: [step@ciam.ru](mailto:step@ciam.ru)

## Multiparametric numerical investigation of a synthetic jet generator for active flow control in transition channels

© V.G. Belova, V.A. Stepanov

Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russia

*The paper focuses on the numerical investigation of the influence of synthetic jet generator units on the flow in transition channels. The study was carried out by RANS and URANS methods. Synthetic jets of zero gas-weight flotation provide a promising active flow control means. By using them, it is possible to reduce or eliminate the flow separation in transition channels improving the characteristics of the aircraft power plant as a whole. The calculations were performed with complete simulation of the synthetic jet generation process in transition channels. Gas-dynamic processes in the cavity of synthetic jet generators are described. The technique for calculating the flow and estimating losses in diffuser channels has been worked out using synthetic jet generator units. As a result, a good coincidence of the calculated and experimental data in the model ring channel was obtained without using active control means, which made it possible to apply this technique to solve other similar problems. Multiparametric numerical investigation was done in a flat model channel in order to determine the best location options and characteristics of synthetic jet generators. We also calculated a segment of the full-scale “aggressive” channel and found that its length was less than the standard one. The calculation was done between high and low pressure turbines of a modern turbojet engine using synthetic jet generator units directed at an angle of 45° to the flow, since a decrease in the total pressure loss for this type of units in the model channel appeared significant. Results suggest that the use of synthetic jet generator units with the necessary amplitude of speed and frequency of oscillations, and with the optimal location in the channel, will improve the characteristics of the engine as a whole due to the complete or partial elimination of the separation zone in the transition channel.*

**Keywords:** active control, RANS and URANS methods, synthetic jets, transition channel, aggressive channel, annular channel

### REFERENCES

- [1] Kashkin Yu.F., Konovalov A.E., Krashennnikov S.Yu., Lyubimov D.A., Pudovikov D.E., Stepanov V.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 2009, no. 4, pp. 91–99.
- [2] Potekhina I.V., Lyubimov D.A. *Nauka i obrazovanie — Science and Education: Scientific Publication*, 2015, no. 1. DOI: 10.7463/0115.0753472
- [3] Lee S., Loth E., Babinsky H. Normal Shock Boundary Layer Control with Various Vortex Generator Geometries. *Computers & Fluids*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 233–246.
- [4] Debiasi M., Herberg M.R., Yan Z., Dhanabalan S.S., Tsai H.M., Dhanabalan S. Control of Flow Separation in S-Ducts via Flow Injection and Suction. *46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Ser. AIAA Paper* (Reno, Nevada, 7–10 January, 2008). Reno, Nevada, USA, 2008, vol. 1355. Paper no. 2008-74. Available at: <https://doi.org/10.2514/6.2008-74>
- [5] Florea R., Bertuccioli L., Tillman T.G. Flow-control-enabled aggressive turbine transition ducts and engine system analysis. *3<sup>rd</sup> AIAA Flow Control Conference*

- (San Francisco, California, 5–8 June, 2006). San Francisco, California, 2006. Paper no. 2006-3512. Available at: <https://doi.org/10.2514/6.2006-3512>
- [6] Zhang P.F., Wang J.J., Feng L.H. Review of zero-net-mass-flux jet and its application in separation flow control. *Science in China, Series E. Technological Sciences*, 2008; vol. 51 (9), pp. 1315–1359.
- [7] Lengani D., Simoni D., Ubaldi M., Zunino P., Bertini F. Application of a synthetic jet to control boundary layer separation under ultrahigh lift turbine pressure distribution. *Flow Turbul. Combust.*, 2011, vol. 87 (4), pp. 597–616.
- [8] Belova V.G., Makarov A.Yu., Maslov V.P., Stepanov V.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, issue 3. DOI 10.18698/2308-6033-2018-3-1737
- [9] Mahfooz Z., Ahmed M.K., Guoping H. Conceptual Designing and Numerical Modeling of Micro Pulse Jet for Controlling Flow Separation. *International Journal of Engineering (IJE)*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 95–101.
- [10] Lyubimov D.A. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2011, vol. 49, no. 4, pp. 557–567.
- [11] *ESI Group. CFD-ACE+*. 2014. Available at: <https://www.esi-group.com/>
- [12] Makarov A.Yu., Stepanov V.A., Maslov V.P. Eksperimentalnye i chislennye issledovaniya metodov upravleniya potokom v perekhodnykh kanalakh aviatsionnykh dvigateley [Experimental and numerical investigation of methods of flow control in transitional channels of aircraft engines]. *Sb. dokl. XI Vseros. s'ezda po fundamental'nyim problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki (Kazan', 20–24 avgusta 2015)* [Proc. of XI All-Russ. Congress on the fundamental problems of theoretical and applied mechanics (Kazan, 20–24 August, 2015)]. Kazan, 2015, pp. 2428–2431.

**Belova V.G.**, engineer, Department of Gas Dynamics and Thermophysics, Central Institute of Aviation Motors, post-graduate student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: gas dynamics, computational mathematics, thermophysics. e-mail: [belova.v.g@mail.ru](mailto:belova.v.g@mail.ru)

**Stepanov V.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Department of Gas Dynamics and Thermophysics, Central Institute of Aviation Motors. Author of over 40 published works in the field of aerodynamics of aircraft power plants. Research interests: gas dynamics, computational mathematics. e-mail: [step@ciam.ru](mailto:step@ciam.ru)